

ANÁLISIS DE LA ESTELA TURBULENTO DE UN PERFIL AERODINÁMICO CON SISTEMA ACTIVO DE CONTROL DE FLUJO

J. Marañón Di Leo^{a,b}; J. S. Delnero^{a,b}; M.O. Garcia Saínz^{a,b} y G.M. Capittini^a

^aUIDET de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, CP C1033AAJ, Cdad. de Buenos Aires, Argentina
Email: jmaranon@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

El estudio de la estela turbulenta cercana a un perfil con sistemas de control nos muestra la configuración del flujo en esas condiciones y los mecanismos de arranque de vórtices y desprendimientos. La estela lejana nos da información sobre la configuración general del modelo. Precisamente, la conformación de la estela, esto es, su “estructura fluidodinámica”, están directamente vinculados con la circulación y por lo tanto sobre las fuerzas resultantes involucradas. Modificaciones sobre la estela cercana, modifican la estela lejana y por ende las fuerzas resultantes. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el desarrollo de las estructuras fluidodinámicas en la estela lejana de un perfil Clark-Y 18, como así también el desarrollo de las mismas cuando se aplican técnicas de control de flujo mediante un miniflap Gurney móvil ubicado en el intradós del modelo en las cercanías del borde de fuga, en diferentes condiciones de accionamiento a diferentes frecuencias, a diferentes ángulos de ataque del perfil y para diferentes condiciones de velocidades incidentes.

Palabras clave: control de flujo, turbulencia, flap Gurney, perfil aerodinámico

INTRODUCCIÓN

Los objetivos del control de flujo en general consistirán, de acuerdo con la conveniencia, en retrasar o adelantar la transición, suprimir o aumentar la turbulencia, prevenir o provocar la separación, con el propósito de reducir la resistencia aerodinámica, aumentar la sustentación, aumentar el mezclado del flujo entre las diferentes capas, inducir la reducción del ruido por métodos fluidodinámicos, etc. Los dispositivos a emplear pueden ser del tipo pasivo y/o del tipo activo. Los sistemas pasivos recurren a dispositivos con características geométricas particulares tales como puntas y bordes filosos con ondulaciones determinadas en la región en la que se origina el proceso de separación del flujo. Los sistemas de control activo están caracterizados por perturbaciones forzadas por algún mecanismo externo, por ejemplo flaps oscilantes, dispositivos vibrantes, ondas de sonido, succión periódica, soplado, calentamiento, etc. En el presente trabajo se propone el estudio de los efectos de un miniflap Gurney, capaz de oscilar “up-down”, ubicado en el intradós cerca del borde de fuga del perfil el cual, en su movimiento oscilante cambiará la estructura fluidodinámica de la estela del perfil, tanto en la zona cercana como lejana, respecto de la que hubiera tenido el mismo sin la presencia del miniflap. Al dejar el borde de fuga, las capas límites provenientes del extradós y del intradós se desprenden transformándose en capas de corte que se enrollan en vórtices constituyendo la estructura vorticiosa característica de la estela mencionada más arriba. A mayor sustentación las capas límites y las mencionadas capas de corte provenientes del intradós y extradós se diferenciarán aún más. Por lo que la estructura vorticiosa de la estela cercana será influenciada por la carga aerodinámica y las características del perfil y ello también afectará a la lejana también. Siguiendo corriente abajo al flujo descendente (downwash) provocado por el perfil detrás del borde de fuga se observará la forma en que el dispositivo activo de control cambiará la estructura vorticiosa, volviéndola más asimétrica que el caso del perfil limpio. En un estudio experimental y numérico de la estela de un perfil con sustentación en una corriente libre laminar, Hah and Lakshminarayana [1] encontraron que la estela alcanza la simetría tan solo a una longitud de cuerda corriente abajo del borde de fuga.

Una descripción más detallada de las estructuras del patrón de flujo de estela generado por un miniflap en base a experimentos con anemometría laser Doppler (LDA) fue comunicada en las referencias [2] y [3]. La influencia del empleo de miniflaps de diferentes longitudes fue tratada en la referencia [4], en la cual se describen asimismo aspectos de la influencia de la turbulencia del flujo incidente de la corriente libre. A fin de lograr reducciones de resistencia “estabilizando la estela” algunos autores sugieren el uso de ranuras, agujeros, flaps aserrados y cuerpos de estela [5] mientras que otros recomiendan la directa eliminación de la calle de vórtices contra rotatorios detrás del miniflap [6]. Otros autores efectuaron experimentos computacionales con generadores de vórtices que actúan dentro de la capa límite del perfil, cerca del borde de fuga [7].

Resulta importante remarcar que hay pocos trabajos relacionados con el comportamiento aerodinámico de perfiles inmersos en corrientes libres turbulentas, como asimismo sobre el análisis cuidadoso de la estructura vorticiosa de la estela de dichos perfiles equipados con dispositivos activos de control de flujo como los miniflaps oscilantes “up-down”. Las capas de corte vinculadas a los miniflaps activos, en la estela de los perfiles, dependerán de manera importante de las características del flujo libre aguas arriba del perfil como asimismo de las frecuencias de oscilación del mismo. Ello implica la necesidad de una medición, más detallada que las efectuadas al presente, de la estructura fluidodinámica de la estela, al menos hasta una cuerda detrás del perfil, lo cual motiva este trabajo.

METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizó el diseño y construcción de un modelo de ala con un perfil aerodinámico Clark Y-18, dotado de un mecanismo eléctrico de accionamiento de un miniflaps Gurney en las inmediaciones del borde de fuga. Dicho modelo se montó y ensayo en túnel de viento a diferentes números de Reynolds en diferentes condiciones de accionamiento del sistema de control y para diferentes ángulos de ataque del modelo. El modelo ensayado tiene una envergadura de 80 cm y 40 cm de cuerda sin torsión geométrica. Los ensayos se efectuaron para un Reynolds Re , basado en la velocidad de la corriente libre y la cuerda del modelo, de 270000 y 135000, esto es, para una velocidad media de la corriente libre aguas arriba de 10m/s y 5 m/seg respectivamente. La intensidad de la turbulencia de la corriente libre fue del 1,8%.

El túnel de viento es de sección cerrada cuya sección transversal es de 1,4m por 1m y una velocidad máxima de 25m/s. El modelo de ala cuenta con un sistema electromecánico que provee de movimiento oscilante vertical a un miniflap tipo Gurney de 6mm de altura (1,5%c), localizado a lo largo de la envergadura a una distancia de 4%c del borde de fuga, en el intradós del modelo de ala. Dicho dispositivo es controlado mediante un sistema que permite el movimiento del flap entre 0 y 30Hz. Los ensayos se realizaron para 4 frecuencias diferentes de movimiento del flap. Las frecuencias son de 16Hz, 20Hz, 25Hz y 30 Hz (Frecuencia 1, Frecuencia 2, Frecuencia 3 y Frecuencia 4, respectivamente) las que, en términos adimensionales (número de Strouhal = $Str = f \cdot c / V_{\infty}$) para la velocidad de la corriente de 10 m/s dichos números serán: 0,64; 0,8; 1 y 1,2, respectivamente y para el caso de 5 m/s tendremos: 1,28; 1,6; 2 y 2,4; respectivamente.

En esas condiciones se midieron las velocidades instantáneas con tres sensores X-wire probes del anemómetro de hilo caliente Streamline (Dantec Measurement Technology). Los sensores se ubicaron uno por encima del otro con una separación vertical de 1cm entre cada uno. La frecuencia de adquisición de datos fue de 2000Hz filtrándose a 1000Hz. Las posiciones-x detrás en la estela (adimensionalizadas según la cuerda “c” del modelo de ala), con el sensor central a nivel del borde de fuga, fueron 0.015; 0.03; 0.045; 0.06; 0.075; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9 y 1.0. Las determinaciones de las velocidades instantáneas se realizaron para un ángulo de ataque del perfil de 0°.



Figura 1. Modelo en el túnel de viento

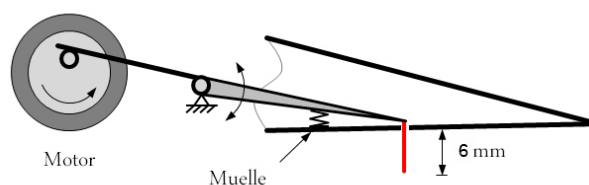


Figura 2. Diseño de sistema de accionamiento del flap

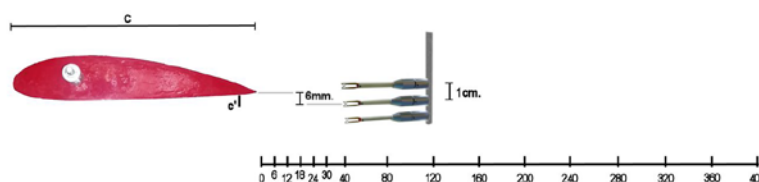


Figura 3. Esquema de medición de los sensores anemométricos

La Figura 1 nos muestra el detalle de la ubicación de los 3 sensores anemométricos X-wire probes detrás del borde de fuga, así como también el modelo en el túnel de viento. En la figura 2 se observa un esquema del sistema de movimiento del dispositivo de control y en la figura 3 se muestra un esquema de los puntos medidos sobre la estela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el estudio de la estela se analizaron velocidades medias e instantáneas, intensidades de turbulencia, escalas espaciales y temporales y espectros de frecuencia para las diferentes configuraciones.

En las siguientes figuras se muestran las velocidades medias para ambas componentes, así como también las intensidades de turbulencia para los casos del perfil solo, el Gurney fijo y a diferentes frecuencias de excitación del flap.

En las Figuras 4 y 5 se observan los resultados del valor medio de la velocidad para la componente u para ambas velocidades de referencia y las tres posiciones correspondientes (Posición 1: Punta B, Posición 0: Punta F y Posición -1: Punta F), en las mismas se parametrizan los resultados para cada posición en la estela. Del análisis de dichas Figuras podemos concluir que las tendencias de los valores se repiten en todos los casos excepto para el caso del perfil solo en el cual se observa un comportamiento diferente de la estela corriente abajo respecto a todos los casos de aplicación del Gurney flap tanto fijo como móvil. Se puede remarcar que los valores de la velocidad se recuperan respecto a la velocidad de referencia para las distancias superiores a la mitad de la cuerda del perfil, con excepción de la Posición -1 (Punta F) donde la recuperación de la velocidad no se observa, allí los valores de la velocidad, para todas las posiciones, se corresponden con los casos de distancia inferiores a la mitad de la cuerda (Posición 0). Además se observa que esta tendencia es similar al cambiar la velocidad, manteniendo cualitativamente el comportamiento, por lo cual a priori para este parámetro existiría una independencia con el Re .

Podemos mencionar que físicamente se observa una caída de velocidad en la componente u en la estela siempre para distancias inferiores a la mitad de la cuerda corriente abajo. Esta caída de velocidad ronda el 50% de la velocidad de referencia para todos los casos con Gurney flap y de un 30%, aproximadamente, para el caso del perfil solo. Estos resultados evidencian el incremento de energía en la estela para los casos de Gurney flap respecto al perfil sin dispositivo.

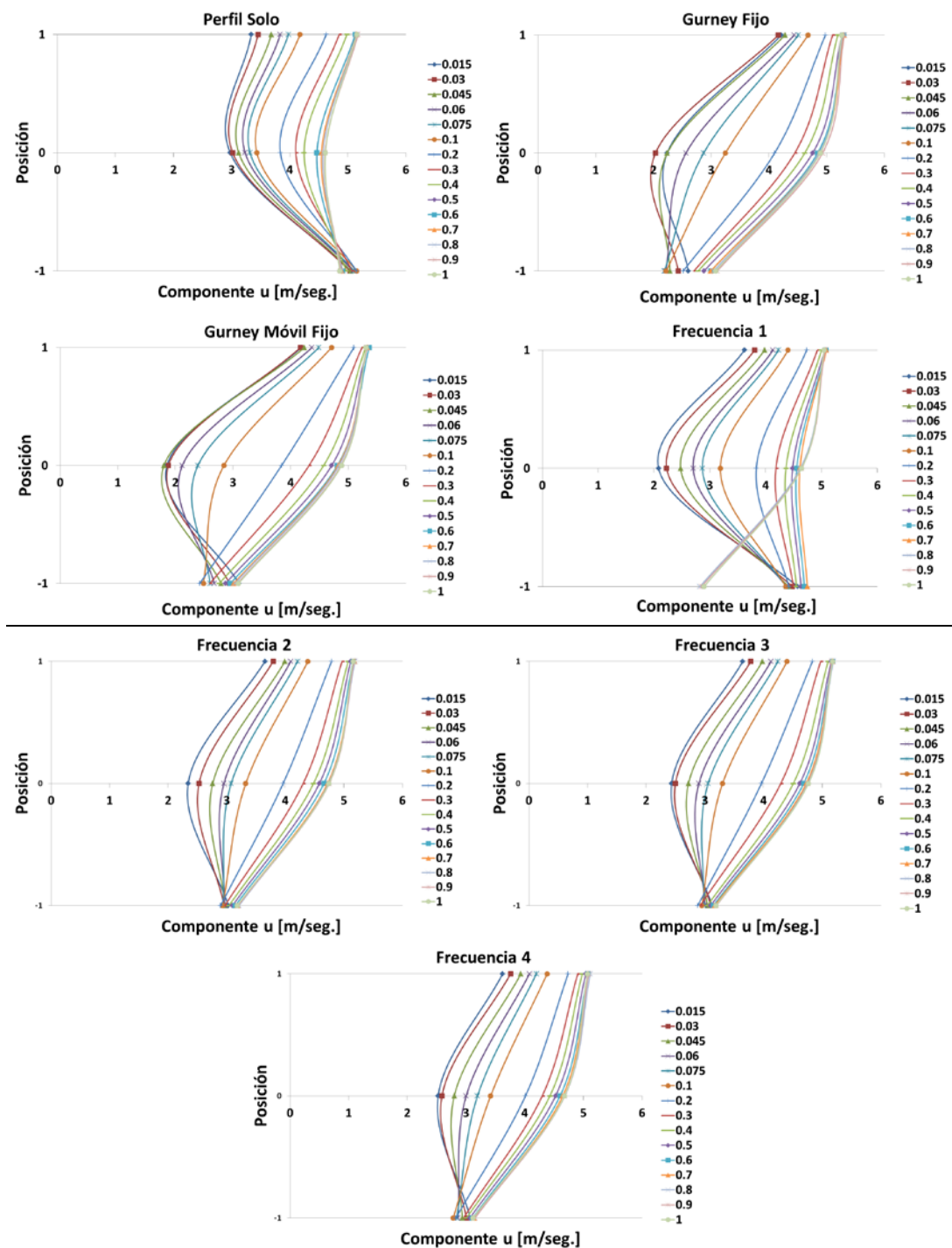


Figura 4. Velocidades medias para la componente u – Velocidad de referencia 5 m/s.

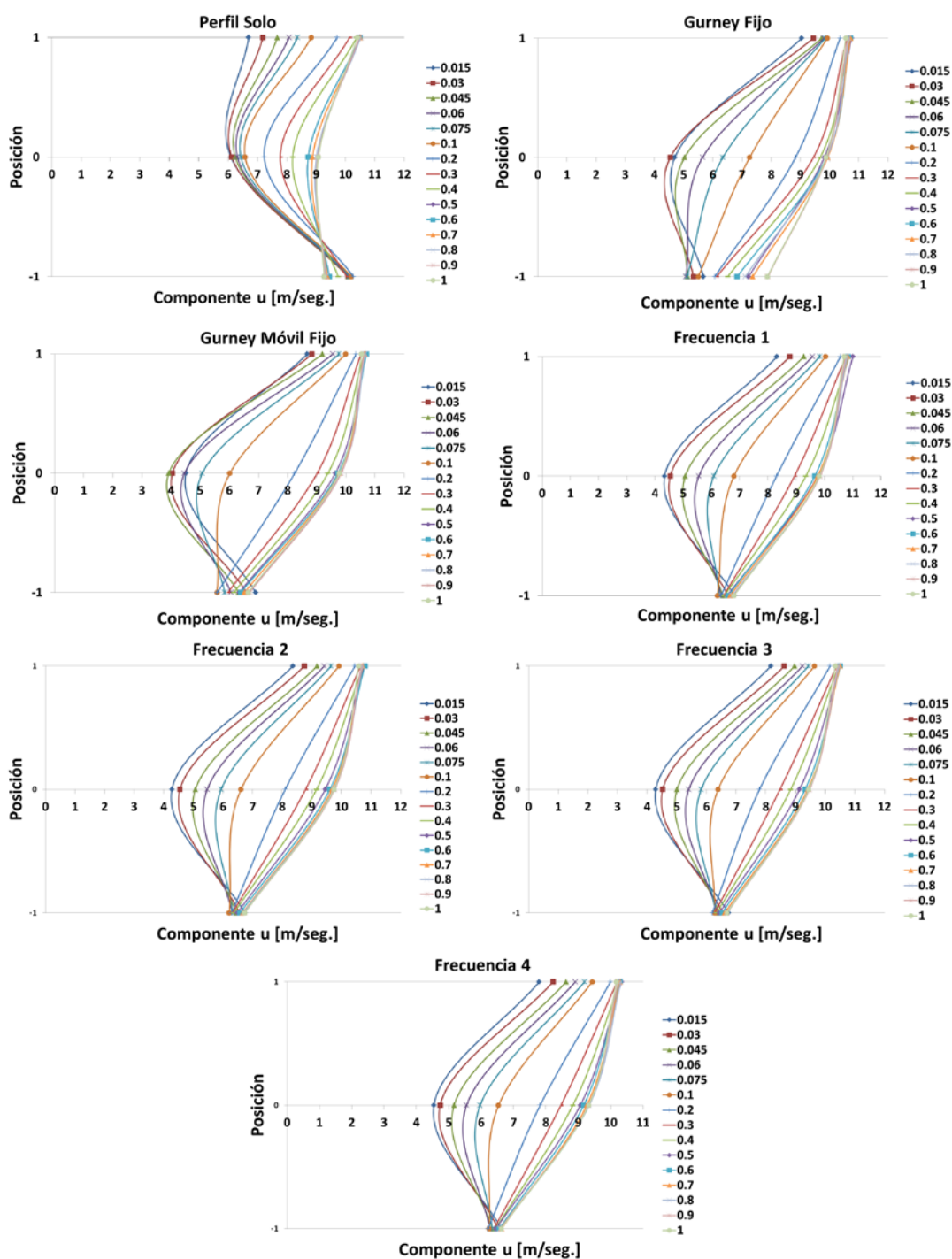


Figura 5. Velocidades medias para la componente u – Velocidad de referencia 10 m/s.

La situación para la componente v de la velocidad cambia radicalmente respecto a la componente u. En las Figuras 6 y 7 se observa este comportamiento para ambas velocidades de referencia, respectivamente.

En ambas Figuras se observan dos tendencias importantes, primero en todos los casos con Gurney flap se presenta muy poca dependencia de los valores con la distancia al dispositivo para cada posición,

pero si entre las posiciones se muestran comportamientos muy diferentes. Para las posiciones 1 los valores son negativos un poco superiores respecto de la posición 0. Pero se observa marcadamente, en todos los casos, valores de velocidad positiva.

Por otro lado el comportamiento de la componente v para el perfil solo muestra una tendencia diferente, siendo de valores negativos para la posición 1 y con cierta independencia respecto a la distancia al perfil, sin embargo en las posiciones 0 y -1 se observa una tendencia similar con un incremento de la componente v hacia valores positivos al acercarse al perfil.

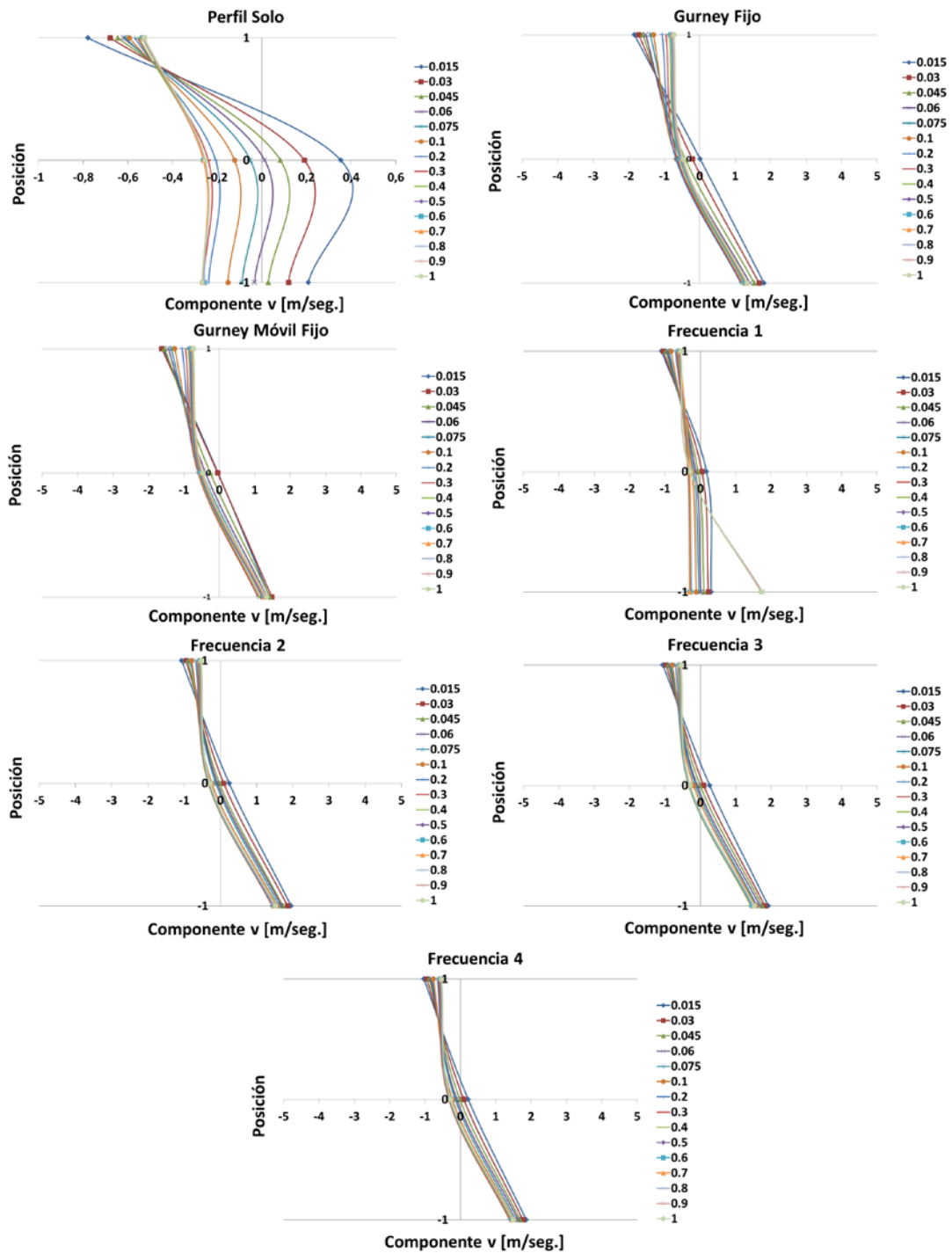


Figura 6. Velocidades medias en la componente v – Velocidad de referencia 5 m/s.

En estos casos se observa una mínima dependencia de la respuesta con el cambio de la velocidad, lo cual podría mostrar un cierto tipo de independencia. Esto podría explicarse por las características de alta energía de la estela con la aplicación del dispositivo.

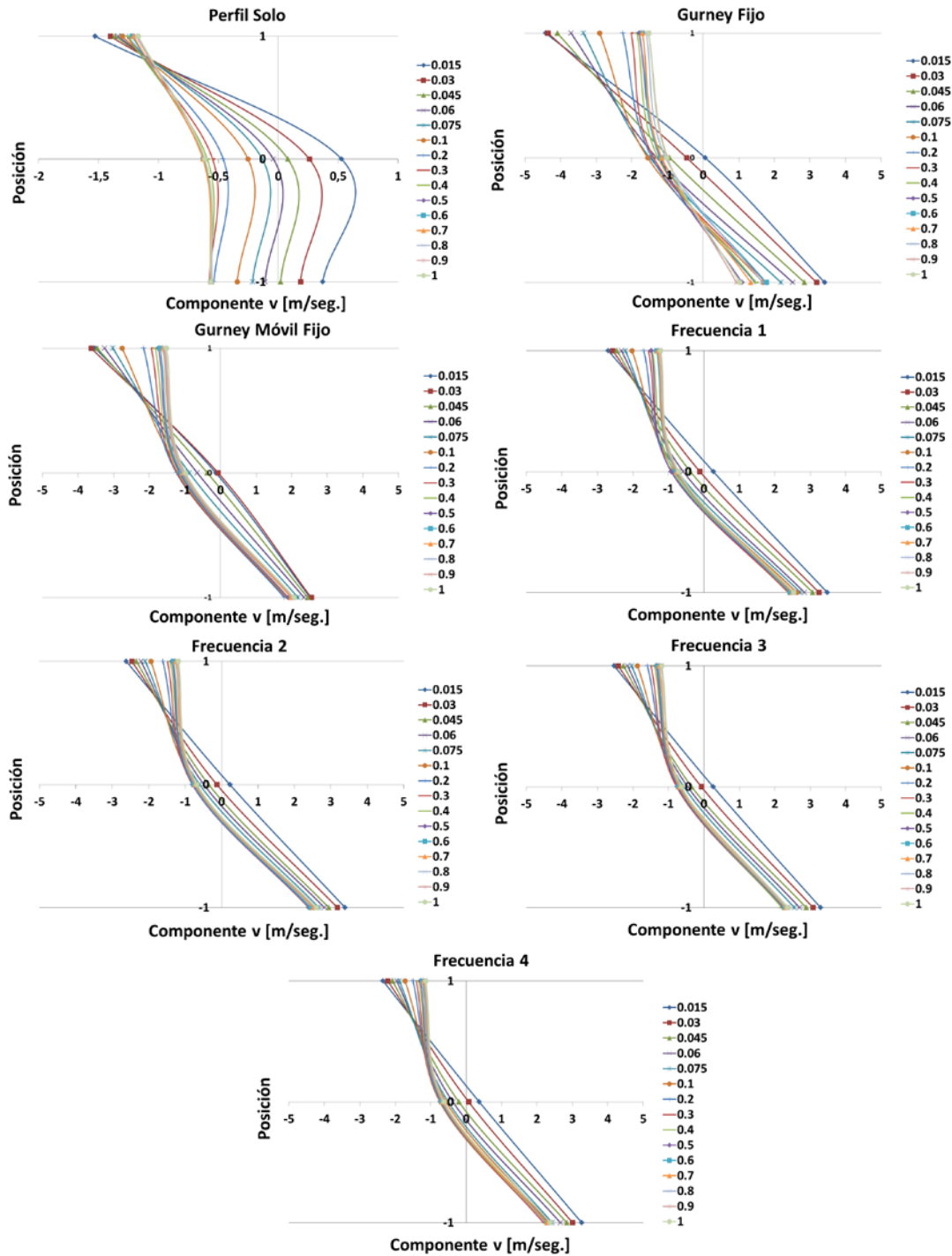


Figura 7. Velocidades medias en la componente v – Velocidad de referencia 10 m/s.

En las Figuras 8 y 9 se pueden observar los resultados de la Intensidad de la Turbulencia para la componente v de la velocidad. Nuevamente, aparece un comportamiento totalmente diferente para los casos de la aplicación del dispositivo respecto al caso del perfil solo. Los incrementos de la intensidad

de turbulencia son notorios comparando el dispositivo con el perfil, siendo para este último valores que no superan el 15%, mientras que para el dispositivo llegan en algún casos a valores cercanos al 50%.

En el perfil solo las posiciones 1 y 0 mantienen valores similares para las distintas distancias, siendo superiores para distancias inferiores al 20% de la cuerda. En el caso de la posición -1 se observa un valor casi constante para cada distancia y que se corresponde con valores de intensidad bajos, similares a las distancias alejadas para las otras posiciones.

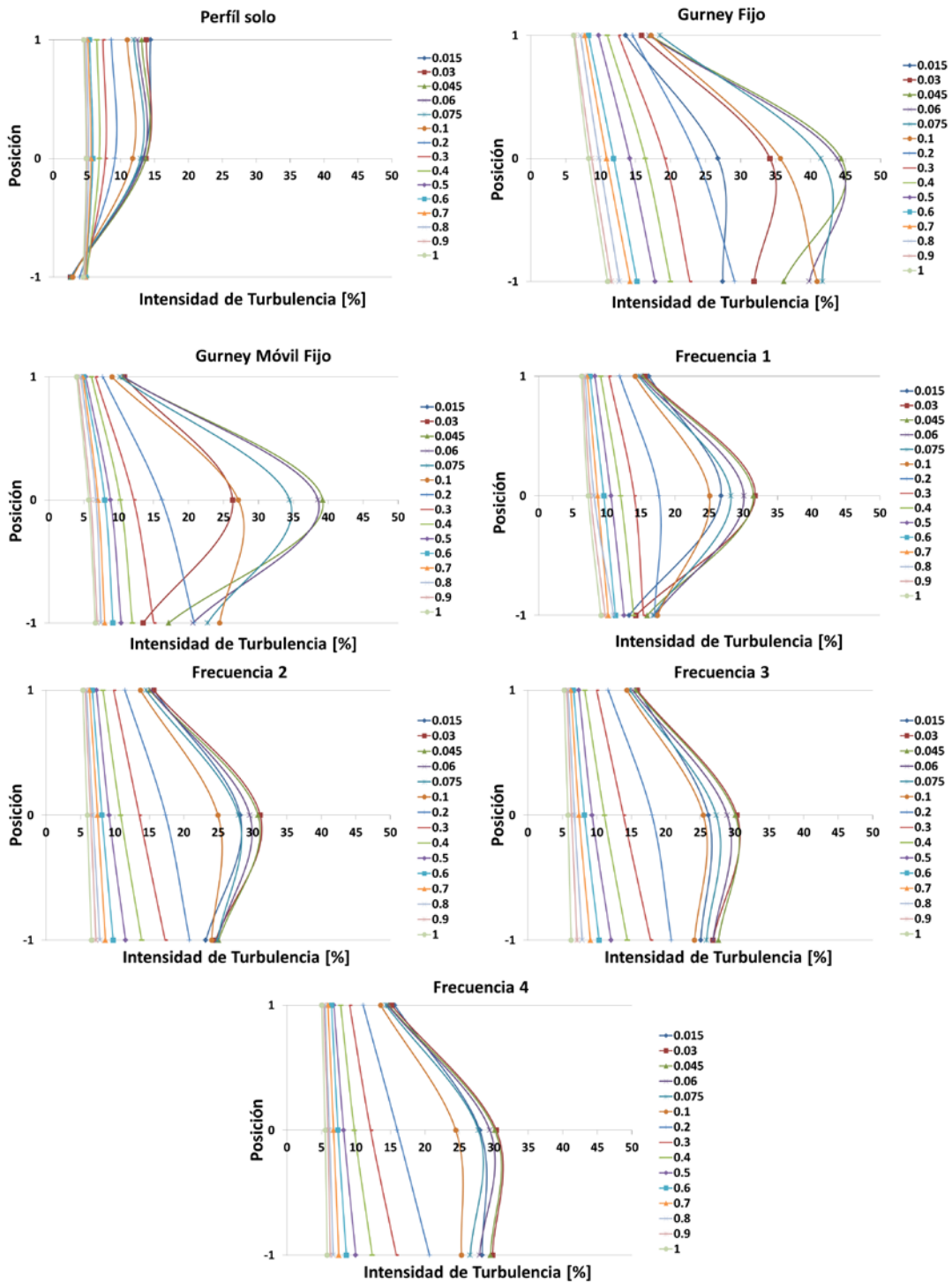


Figura 8. Intensidad de la Turbulencia para la componente v – Velocidad de referencia 5 m/s.

Por otro lado, para los casos del dispositivo, se observa una marcada tendencia por la cual los valores máximos de intensidad se dan para la posición 0.

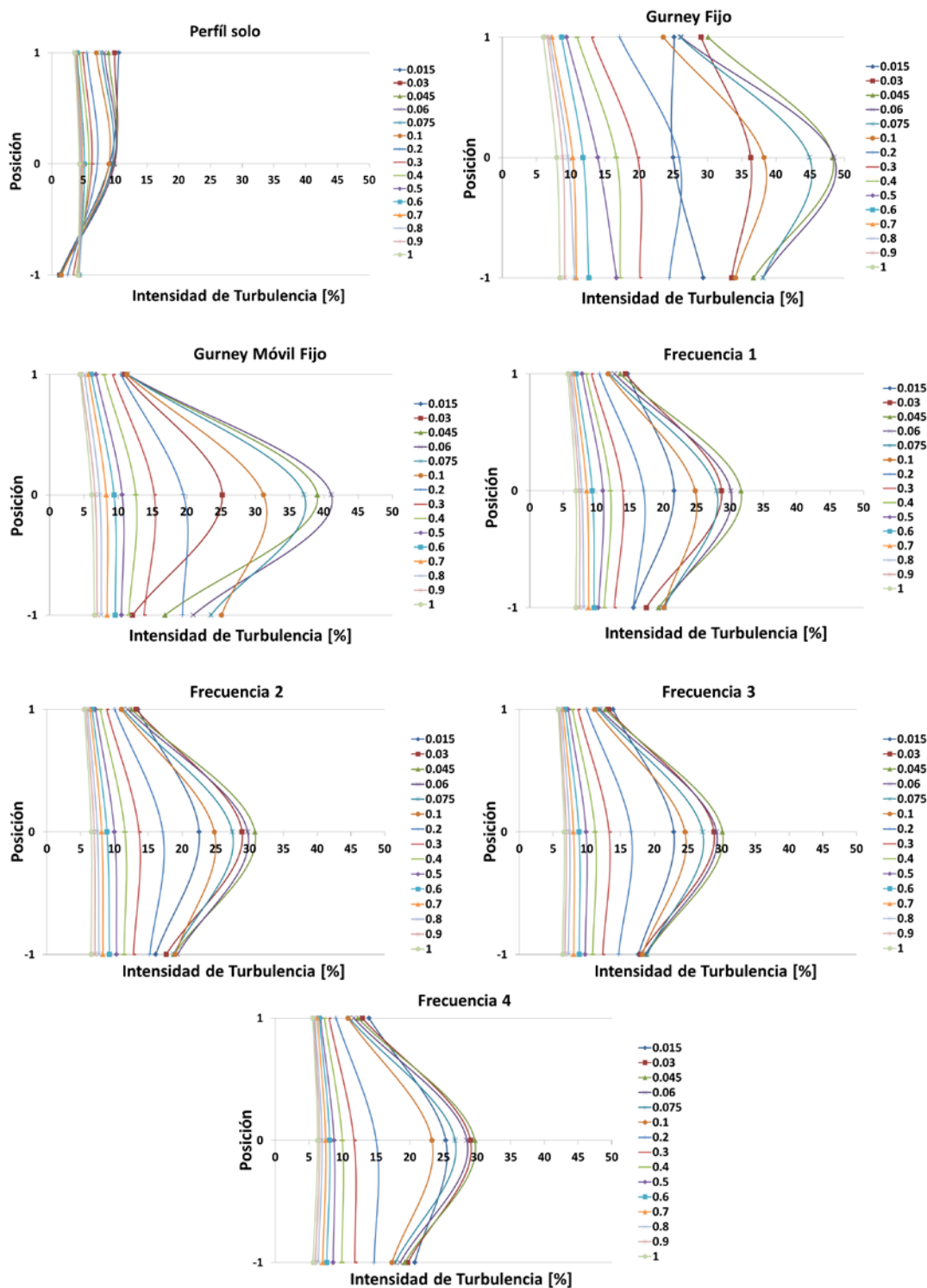


Figura 9. Intensidad de la Turbulencia para la componente v – Velocidad de referencia 10 m/s.

Nuevamente se observa una independencia bastante marcada respecto a la variación de la velocidad incidente.

A partir de las observaciones, previamente realizada, se propone analizar la escala integral de la turbulencia a partir de la escala temporal, determinada por la teoría del flujo congelado. En función de la misma se determinan, a partir de la escala temporal la escala espacial de la turbulencia. Como ejemplo, y para el análisis de los resultados se presenta la Figura 10 la determinación de las escalas espaciales para tres casos típicos. El primero es el perfil solo, para este se observa que las escalas

permanecen casi invariantes para las diferentes posiciones a lo largo de la estela corriente abajo del perfil, como era de esperar la estela turbulenta generada corriente abajo del perfil y para la condición de 0° de ángulo de ataque del perfil se mantiene constante y de bajo espesor. Para el caso del Gurney fijo ubicado en el borde de fuga se observa una estela creciente corriente abajo del perfil, dado el incremento de las escalas en la misma. El caso novedoso se presenta con el Gurney flap ubicado al 4% de la cuerda desde el borde de fuga, y con un movimiento a una frecuencia de 25 Hz. (frecuencia 3). En esta configuración aparece una variación de escalas desde más grandes en las cercanías del perfil, luego disminuyendo y luego volviendo a incrementarse superada la media cuerda del perfil (200 mm.) corriente abajo.

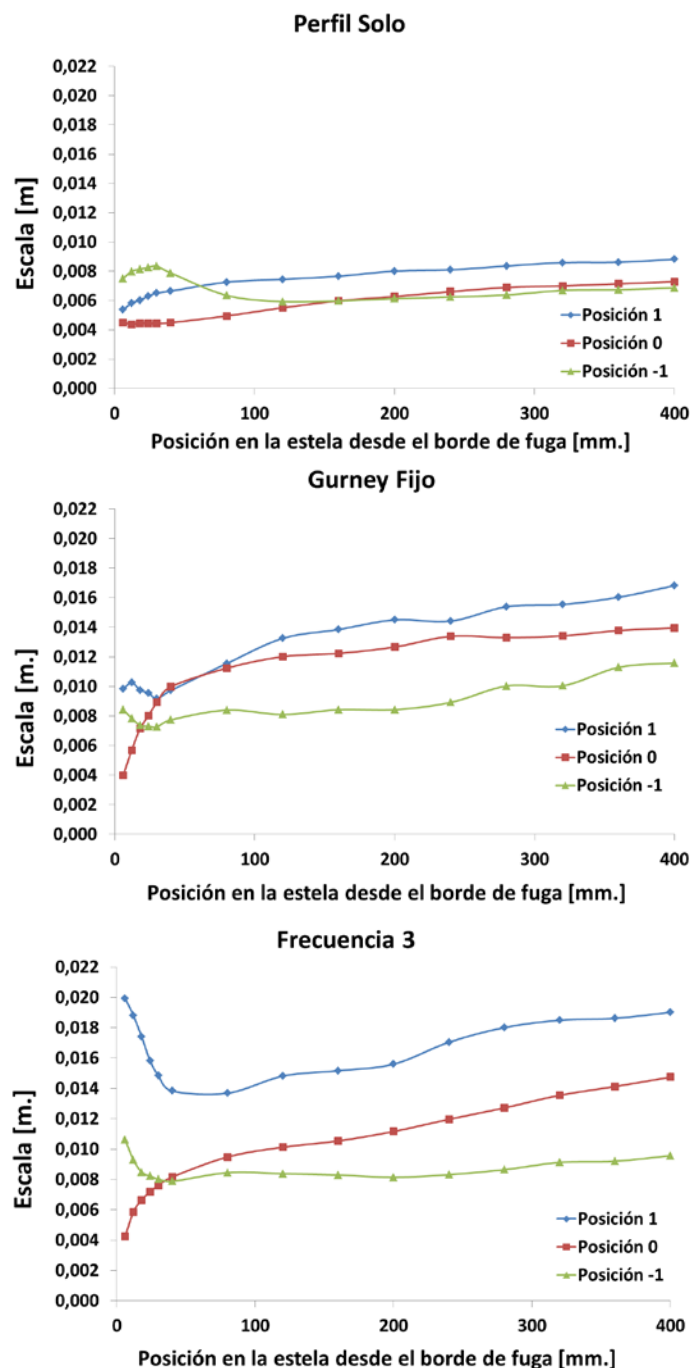


Figura 10. Escalas espaciales para casos característicos.

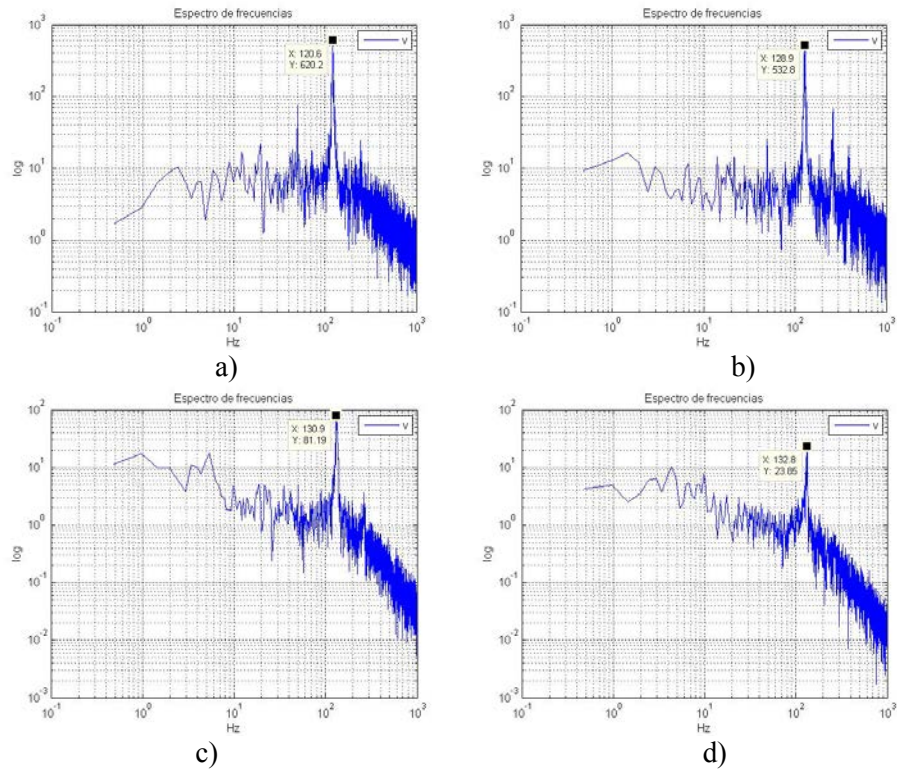


Figura 11. Espectros densidad de potencia para la componente v. Caso del Gurney flap fijo en el borde de fuga, para la Punta B a las distancias a) 0,006 m.; b) 0,04 m.; c) 0,5c y d) 1c.

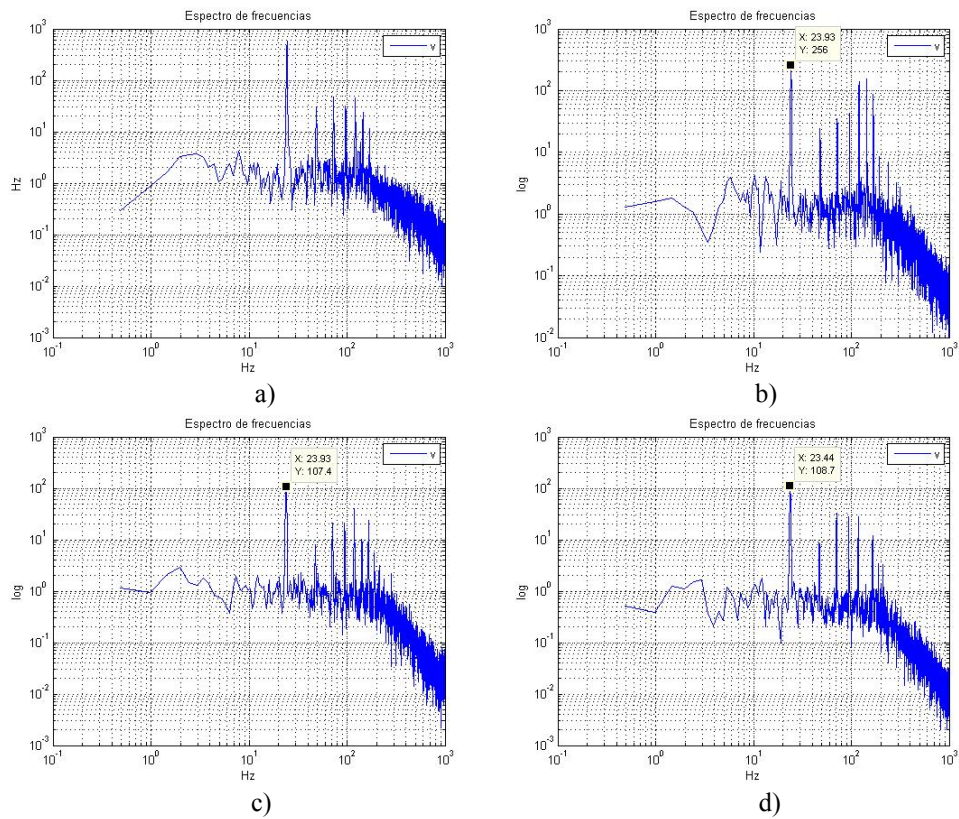


Figura 12. Espectros densidad de potencia para la componente v. Caso del Gurney flap móvil (Frecuencia 3), para la Punta B a las distancias a) 0,006 m.; b) 0,04 m.; c) 0,5c y d) 1c.

En las Figura 11 y Figura 12 se observa un ejemplo de los espectros de densidad de potencia para la componente v de la Punta B, para los casos del Gurney flap fijo en el borde de fuga y del Gurney flap móvil a la frecuencia 3. En el caso del Gurney fijo se observa la aparición de un pico de energía marcado, como ha sido detectado anteriormente. Para el caso del Gurney móvil se observa el pico de energía que concuerda con la frecuencia de accionamiento del dispositivo, y posteriormente una serie de armónicos.

Luego se muestran unas tablas resumen (Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3) de los picos del valor de energía en el espectro, para similares casos.

Tabla 1. Picos del valor del espectro y frecuencias para el caso del perfil solo.

	Distancia mm.	6	12	18	24	30	40	80	
Punta B	frecuencia [Hz.]	155,8	183,6	162,6	50,78	6,348	117,7	191,9	
	S(f)	4,657	3,693	3,437	3,445	3,478	2,542	2,718	
Punta E	frecuencia [Hz.]	33,69	190,4	23,44	18,55	33,2	174,8	212,4	
	S(f)	1,985	2,849	3,232	2,663	2,253	2,494	2,346	
Punta F	frecuencia [Hz.]	43,46	49,8	0,9776	49,8	49,8	49,8	49,8	
	S(f)	0,107	0,233	0,237	0,296	0,464	0,806	0,727	
	Distancia mm.	120	160	200	240	280	320	360	400
Punta B	frecuencia [Hz.]	151,4	235,8	49,8	219,7	219,9	238,8	211,4	49,8
	S(f)	1,869	1,942	1,728	1,492	1,784	1,38	1,403	1,723
Punta E	frecuencia [Hz.]	187,5	247,1	175,3	206,5	223,6	228,5	211,4	247,1
	S(f)	2,415	2,417	2,198	1,979	2,064	2,082	2,276	1,973
Punta F	frecuencia [Hz.]	187,5	247,1	243,7	233,4	243,7	228,5	211,4	197,8
	S(f)	0,8511	1,165	1,241	1,85	1,663	1,784	1,873	1,527

Tabla 2. Picos del valor del espectro y frecuencias para el caso del Gurney móvil con frecuencia 3.

	Distancia mm.	6	12	18	24	30	40	80	
Punta B	frecuencia [Hz.]	24,41	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	
	S(f)	578,2	572,5	495,2	370	360,7	256	146,6	
Punta E	frecuencia [Hz.]	24,41	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	
	S(f)	91,81	184,9	224,7	211,7	234,1	266,8	148,9	
Punta F	frecuencia [Hz.]	24,41	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	
	S(f)	213,4	143,6	79,8	56,83	61,75	96,88	118,9	
	Distancia mm.	120	160	200	240	280	320	360	400
Punta B	frecuencia [Hz.]	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,44
	S(f)	168,8	150,5	17,4	141,6	128,7	120,2	125,5	108,7
Punta E	frecuencia [Hz.]	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,44
	S(f)	138,1	113,3	91,78	113,5	108,6	108	119,8	107
Punta F	frecuencia [Hz.]	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,93	23,44
	S(f)	82,36	49,22	33,7	29,05	28,03	29,59	22,56	24,55

Tabla 3. Picos del valor del espectro y frecuencias para el caso del Gurney móvil fijo.

	Distancia mm.	6	12	18	24	30	40	80	
Punta B	frecuencia [Hz.]	120,6	122,6	127	125,5	126,5	128,9	129,4	
	S(f)	620,2	977,2	820,6	787,8	750,2	532,8	360	
Punta E	frecuencia [Hz.]	120,6	122,6	122,6	125,5	126,5	128,9	129,4	
	S(f)	71,66	484,2	838,8	1422	1562	1240	893,3	
Punta F	frecuencia [Hz.]	120,6	122,6	126,5	125,5	126,5	128,9	129,4	
	S(f)	650,7	786	463,9	663,2	745,8	531,8	436,7	
	Distancia mm.	120	160	200	240	280	320	360	400
Punta B	frecuencia [Hz.]	131,8	134,8	130,9	130,9	130,9	134,3	133,8	132,8
	S(f)	171,9	160,2	81,19	65,21	37,21	49,84	25,77	23,85
Punta E	frecuencia [Hz.]	131,8	134,8	130,9	133,8	130,9	134,3	134,3	132,8
	S(f)	436,3	391,2	186,4	158,6	110,7	153,3	69,76	60,2
Punta F	frecuencia [Hz.]	132,3	134,8	130,9	133,8	130,4	134,3	133,8	130,9
	S(f)	186,9	213,1	103,7	80,86	57,16	90,4	46,12	36,21

De las tablas precedentes podemos hacer notar que no se aprecian cambios importantes en la energía de la estela para el caso del perfil solo. Salvo por una pequeña distorsión seguramente provocada por una inestabilidad en el flujo. Se observa para el caso del Gurney móvil fijo una disminución en la energía de la estela corriente abajo del perfil. Los espectros del Gurney móvil (frecuencia 3) muestran que la energía se mantiene más estable sobre la estela. Las energías son bajas en el perfil solo en toda la estela, condición esperable, siendo muy importantes en el caso del Gurney móvil fijo respecto al caso móvil. La energía de la estela del Gurney fijo va disminuyendo a diferencia del Gurney móvil el cual no tiene un comportamiento determinado.

CONCLUSIONES

En todos los casos, y cualitativamente, no aparece una notable dependencia de la configuración del flujo en la estela al cambiar el número de Re (es decir la velocidad de referencia).

En estas condiciones, podemos concluir que el Gurney móvil genera una estela menos turbulenta que la del perfil con Gurney Fijo, en cualquiera de los casos. Destacándose siempre un valor superior en la zona central de la estela (Punta E: posición 0). Las escalas espaciales de turbulencia aumentan en el caso del Gurney fijo y Gurney móvil con respecto al perfil solo, incrementándose corriente abajo en forma gradual.

En estas condiciones podemos concluir, finalmente, que existe un comportamiento claramente notorio en la configuración de la estela con la aplicación de movimiento al Gurney flap, modificándose notablemente la estela respecto a los dos casos del dispositivo fijo y del perfil solo, generándose escalas de vórtices mayores bajando la intensidad de la turbulencia. A pesar de ello el downwash permanece con pequeñas modificaciones en toda la estela (valores positivos de v) para la posición -1.

Es decir que el sistema móvil aún mantiene la capacidad de incrementar la sustentación del perfil, aunque en menor magnitud que los casos fijos, pero sin bajar la eficiencia puesto que la resistencia por desprendimiento del flujo sería menor, por lo cual estamos en presencia del control de la estela manteniendo las características básicas del dispositivo fijo.

REFERENCIAS

1. Hah C., Lakshminarayana B.: Measurement and prediction of mean velocity and turbulence structure in the near wake of an airfoil; Journal of Fluid Mechanics. Vol.115, 1982 pp. 251-282.

2. Jeffery, D.R.M., Hurst, D.W.: Aerodynamics of the Gurney Flap; AIAA Applied Aerodynamic Conference, AIAA 96-2418-CP, 1996.
3. Jeffrey, D., Zhang, X., Hurst, D.W.: Aerodynamics of Gurney Flaps on a Single-Element High-Lift Wing; Journal of Aircraft, Vol. 37, 2000, pp. 295-301.
4. Bacchi, F., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Colman, J., Martinez, M., Camocardi, M., Boldes, U.: Determinación experimental del efecto de mini flaps Gurney sobre un perfil HQ-17; Fluidos-2006, Mendoza, Argentina, 2006.
5. Van Dam, C.P. Yen, D.T., Vijgen, P.M.H.W.: Gurney Flap Experiments on Airfoil and Wings; Journal of Aircraft (0021-8669), Vol.36, No.2, 1999, pp. 484-486.
6. Schatz, M., Guenther, B., Thiele, F.: Computational Modeling of the Unsteady Wake behind Gurney-Flaps; 2nd AIAA Flow Control Conference, AIAA-2417, Portland, Oregon, USA, 2004.
7. Zulkefli, N.F.; Hussin, F.; Abdullah, M.Z. & Ahmad, K.A.: Numerical investigations of flow field induced by sub-boundary layer vortex generators; Int. Rev. of Aerospace Eng. (IREASE). Praise Worthy & Prize. Feb. 2010